

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Conference Paper, Published Version

**Daus, Philipp; Sepri, Maila; Biskup, Frank; Arlit, Raphael**

## **Methoden zur Ermittlung und Bewertung von Standortdaten für die Nutzung der Gezeitenströmungsenergie**

Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:

**Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik**

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/103622>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Daus, Philipp; Sepri, Maila; Biskup, Frank; Arlit, Raphael (2011): Methoden zur Ermittlung und Bewertung von Standortdaten für die Nutzung der Gezeitenströmungsenergie. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): Wasserkraft mehr Wirkungsgrad + mehr Ökologie = mehr Zukunft. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 45. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 347-359.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



## **Methoden zur Ermittlung und Bewertung von Standortdaten für die Nutzung der Gezeitenströmungsenergie**

Philipp Daus, Maila Sepri, Frank Biskup, Raphael Arlitt

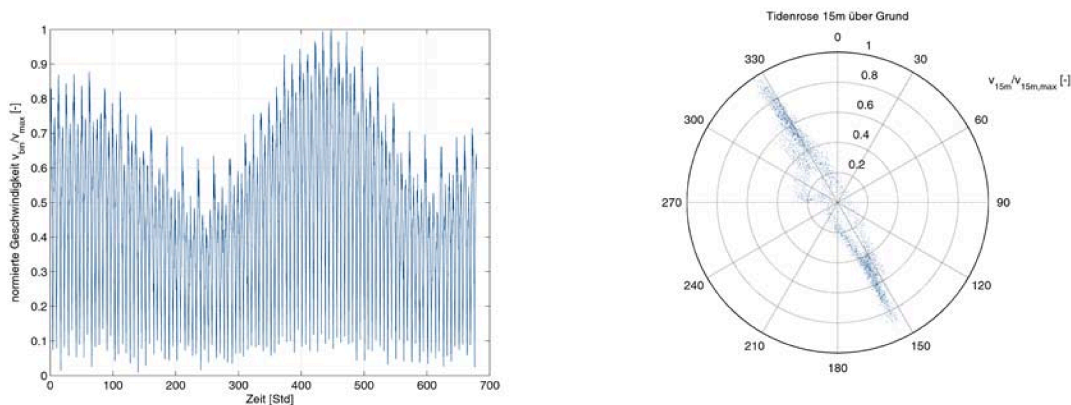
Die vorliegende Arbeit beschreibt in zwei Teilen zunächst die notwendigen Schritte, um eine Gezeitenströmungsressource hinreichend genau bestimmen zu können. Dabei werden Werkzeuge und Methoden benannt, die es ermöglichen schon früh in der Projektphase eine wirtschaftliche Einschätzung zu geben und letztendlich alle für die Design Basis und Lastannahmen notwendigen Parameter zu bestimmen. Im zweiten Abschnitt wird die Messung der Strömung durch ein ADCP und die Auswertung der Daten gerade im Hinblick auf die für die Lastannahmen wichtigen Turbulenzparameter näher diskutiert. Auf Basis verschiedener verwandter Untersuchungen schließt die Arbeit mit der Beschreibung einer Auswertung in „Beam“-Koordinaten ab, um wichtige Kenngrößen der Turbulenz zu ermitteln.

The first part of the presented work describes all necessary steps which needs to get passed in order to be able to sufficiently characterise a tidal resource. Thereby available tools, equipment and methods are stated capable of determining the economical value of the project within the first stages. Also they yield the necessary parameters for the specification of the design basis and the subsequent load assumptions of the machine. In the second part the flow measurement by an ADCP as well as the analysis of the data are generally described and discussed in more detail. The focus lies on the turbulence parameters which have a significant effect on the loads the turbine has to withstand. On basis of other related studies the work closes with a brief description of the data analysis in beam coordinates from which some of the turbulence parameters can be obtained.

### **1 Die Energie der Gezeiten**

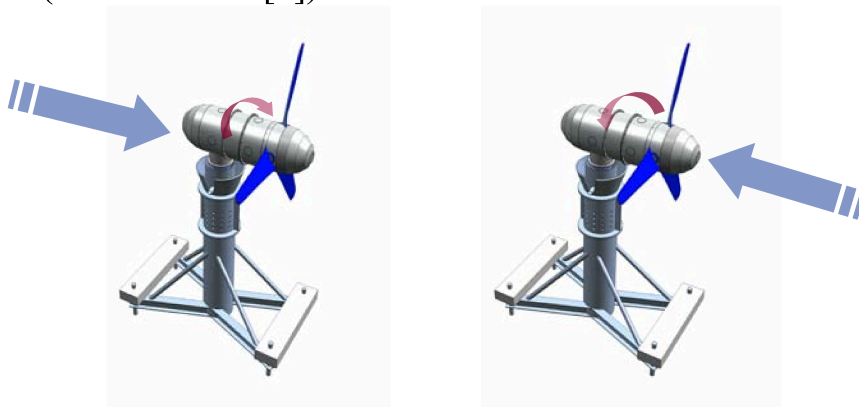
Die Gezeitenströmungsenergie erfährt gegenwärtig in bestimmten Gebieten der Erde eine erhöhte Aufmerksamkeit und es werden ernsthafte Anstrengungen unternommen dieser Technologie zur Marktreife zu verhelfen. Einer dieser Gebiete ist beispielsweise der Raum Großbritannien, wo durch Inselgruppen nahe des Festlandes kanalförmige Stromschnellen entstehen, wenn die Kräfte der Gezeiten Wassermassen des Atlantiks in die Nordsee drücken (Flut) oder diese wieder aus der Nordsee abfließen (Ebbe).

Dieser periodische Wechsel der Strömungsgeschwindigkeit (Abb. 1), der in Stärke und Periode abhängig ist vom betrachteten Ort und dem Verlauf der Gestirne (Wechselspiel zwischen Mond, Erde und Sonne), ist vorhersagbar und bietet daher eine hervorragende Bedingung für die Energieentnahme bzw. -vermarktung [1].



**Abb. 1** Strömungsgeschwindigkeit (normiert) und Strömungsrichtung am Beispiel EMEC (ADCP Messung)

Der entstehende Markt für Gezeitenströmungsturbinen zeigt eine vielfältige Auswahl an Konzepten, Prototypen und bereits installierten Anlagen verschiedener Hersteller. Oftmals ist dabei das Design von dem der Windrotoren abgeleitet. Auch die Anlage, die von Voith Hydro Ocean Current Technologies (VHOCT) entwickelt wird (Abb. 2), verfolgt das Konzept eines dreiblättrigen Rotors mit horizontaler Achse, verknüpft aber die Vorteile dieser Ausführung (bsw. Laufruhe) mit einer den Umweltbedingungen angepassten robusten und zuverlässigen Auslegung der gesamten Anlage. Auf verstellbare Blätter („Pitch“) wird ebenso verzichtet wie auf eine Nachführung des Rotors („Yaw“), was durch leistungsoptimierte, symmetrische Rotorblätter und die definierte, oftmals bidirektionale Strömungsrichtung (siehe Abb. 1) ermöglicht wird. Somit ist eine Energieentnahme sowohl während der Ebb- als auch der Flutströmung gewährleistet (näheres siehe [9]).



**Abb. 2** Das Design der Voith-Anlage schematisch dargestellt

Die Anlage ist im Betrieb ständig wechselnden und mitunter extremen Umweltbedingungen ausgesetzt, die hohe Anforderungen an Material und Technik stellen. Nur eine hinreichende Kenntnis dieser Bedingungen macht dabei einen sicheren und zudem wirtschaftlichen Betrieb der Anlage überhaupt möglich. Auf der anderen Seite sind die Messverfahren, die zur Erhebung notwendiger Daten zur Verfügung stehen, begrenzt oder deren Leistungsfähigkeit beschränkt. Ziel der vorliegenden Arbeit ist, die Standortvermessung, deren Messverfahren und Methoden vorzustellen und zu diskutieren. Es wird sich zunächst der Beschreibung des Standortes, den wichtigsten Kenngrößen und den vorhandenen Messverfahren gewidmet. Anschließend werden Methoden für die Auswertung und Bewertung von Strömungsmessdaten vorgestellt und diskutiert. Die Arbeit endet mit einem kurzen abschließenden Fazit.

## 2 Beschreibung von Standorten für Gezeitenströmungsanlagen

### 2.1 Die verschiedenen Phasen der Standortvermessung

Die Standortvermessung dient dazu, zum einen möglichst früh eine wirtschaftliche Prognose der Gezeitenressource zu geben und im weiteren Verlauf die Randbedingungen für eine Auslegung der Anlage festzustellen. Die verschiedenen Stationen werden im Folgenden vorgestellt (Abb. 3) und sind dabei, neben Erfahrungen der Firma Voith, an international anerkannten Standards und Richtlinien (siehe [2], [3] und [4]) angelehnt.

Ein potentieller Standort für eine Gezeitenströmungsanlage zeichnet sich prinzipiell durch die folgenden vier Punkte aus und kann dabei durch Tidenatlanten, geografische Karten, Luft- und Satellitenbilder in einer ersten Phase (A) lokalisiert werden.

- hohe maximale Strömungsgeschwindigkeit und großer Zeitanteil hoher Geschwindigkeiten
- eindeutige Vorzugsrichtung der Strömungsgeschwindigkeit und Bidirektionalität der Gezeitenströmung
- geringer Einfluss durch Scherströmungen aufgrund umliegender Landmassen
- geeignete Wassertiefe

Die Feststellung dieser eher qualitativen Parameter ist dabei mit vergleichsweise geringen Kosten verbunden. Diese Informationen lassen aber bereits eine Bewertung der Wirtschaftlichkeit der Region zu, da Kosten für Logistik (Stadt- und Hafenanbindung), Infrastruktur (Straßen- und Netzanbindung) sowie der Ertrag

aufgrund von charakteristischen Strömungsgeschwindigkeiten überschlagen werden können. Auftretende Lasten, wie sie eine Anlage erfährt, können ebenfalls rudimentär abgeschätzt werden. Allerdings besitzen die Daten oft keine hohe Auflösung und spiegeln die unterschiedlichen Strömungsverhältnisse, sowie Welleneinflüsse im Kanal nicht wider.

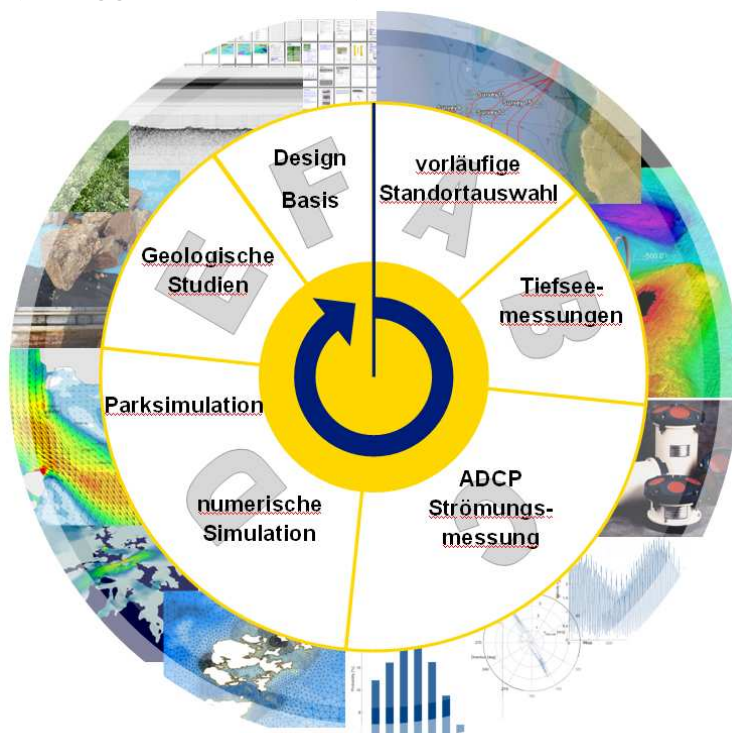
Phase A schließt mit einer genaueren Spezifikation und vorläufigen Standortauswahl ab, welcher Ort für eine Vermessung der Strömung in Frage kommt.

In Phase B werden Tiefenmessungen durchgeführt, um im gesamten Gebiet Informationen über die Wassertiefen und etwaige Objekte am Meeresboden zu erlangen. Diese Information ermöglicht die Beurteilung des Strömungskanals im Hinblick auf den Installationsort und die Abmessungen (Rotordurchmesser) einer oder mehrerer Anlagen. Auf die Lastabschätzung haben diese Daten zunächst keinen Einfluss.

Phase C beinhaltet die Messung der Strömung über den Zeitraum mindestens einer Nipp- und einer Springtide mit einem „Acoustic-Doppler-Current-Profiler (ADCP)“. Diese Phase ist also mit einem deutlich höheren Zeit- und Kostenaufwand (Ausrüstung und Operation) verbunden. Gleichzeitig liefert sie aber je nach Ausrüstung und Konfiguration des Messgeräts detaillierte Strömungsdaten (und ggf. Wellendaten) des Standortes. Somit ist der Informationsgehalt bzgl.

Wirtschaftlichkeit und auftretenden Lasten der Gezeitenressource hoch.

Die gewonnenen Strömungsdaten (und ggf. Wellendaten), die Tiefendaten und verschiedene Randbedingungen (bsw. von Bojen gemessene Wellen) werden in Phase D genutzt, ein numerisches Modell des Gebietes zu erstellen, zu kalibrieren und hierdurch Strömungsinformationen im gesamten Gebiet abzuleiten. In erster Linie liefert diese Simulation die Position mit den wirtschaftlich besten Strömungsbedingungen und



**Abb. 3** Die Stationen der Standortvermessung von erster Begutachtung bis zur fertigen Design Basis

kann weiterhin dazu verwendet werden die Anordnung mehrerer Anlagen im Hinblick auf den Jahresenergieertrag zu optimieren. Ein weiterer wichtiger As-

pekt, der höhere Anforderungen an das Modell stellt, ist allerdings die Simulation von Wellenaktivitäten und deren Interaktion mit der Strömung, um somit die maximalen Wellenhöhen des Standortes statistisch feststellen und mit maximalen Strömungsgeschwindigkeiten korrelieren zu können.

Der Aufwand, der für die Erstellung des numerischen Modells, die Rechnung und die Auswertung betrieben werden muss, ist hoch, jedoch stellen diese Daten eine zwingende Voraussetzung für Auslegung der Anlage dar und haben daher vor allen Dingen auf die anzunehmenden Lasten erheblichen Einfluss.

Es sei angemerkt, dass für die Erstellung des Modells zunächst auch nur niedrig aufgelöste ADCP Daten hinreichend sind. Ist der letztendliche Standort der Turbine noch offen, macht es somit gegebenenfalls Sinn eine einfache ADCP Messung der Modellrechnung voranzustellen und erst anschließend den Ort einer zweiten, technisch anspruchsvolleren hoch aufgelösten ADCP Messung zu bestimmen. Im Falle einer Neubestimmung des Installationsortes auf Basis der Ergebnisse des Modells, aber auch nur dann, kann dies zu einer Kosteneinsparung führen.

In Phase E werden Videoaufnahmen des Bodens, Bodenproben und seismische Untersuchungen zur Bodenbeschaffenheit vorgenommen, um die Wahl und Auslegung der Gründungsstruktur zu bestimmen. Diese Messungen haben einen weiteren Einfluss auf Randbedingungen, die für die Lasten der Turbine verantwortlich sind. Die Wirtschaftlichkeit kann hierdurch ebenfalls beeinflusst werden.

Nach Auswertung und Zusammenfassen der erhobenen Daten werden diese Teil der „Design Basis“, die als Grundlage für die Auslegung der Anlage dient (Phase F). Dieser Teil begleitet letztlich alle vorangegangenen Schritte und beinhaltet ebenfalls die Auswertung, Nachbearbeitung, Filterung und Bewertung der erhobenen Daten, was einen Einfluss auf die anzunehmenden Lasten und die Wirtschaftlichkeit des Projekts hat. Weiterhin begleitet dieses Dokument auch alle weiteren Phasen des Projekts, da es gerade bei einer so jungen und einzigartigen Technologie immer wieder zu neuen noch unbeantworteten Fragen kommt.

## **2.2 Wichtige Kenngrößen und deren Einfluss auf die Anlage**

Im Laufe der Standortvermessung, wie sie unter 2.1 beschrieben ist, werden notwendige Parameter bestimmt, die als Grundlage für die Auslegung der Anlage dienen. Tab. 1 zeigt eine Übersicht der Parameter und welchen Effekt diese auf die Auslegung, den Betrieb und die Lasten der Turbine haben. Zusätzlich ist die Methode bzw. die Art des Messgeräts angegeben, ohne dabei auf die Konfiguration einzugehen.

**Tabelle 1** Die Kenngrößen eines Standortes für Gezeitenströmungsturbinen

Kenngröße	Parameter [Einheit / Format]	Einfluss	Vermessungs- phase - Methode
Gebiets-Koordinaten	GPS [WGS84]	Genehmigungsver- fahren	A.1 - geografi- sche Karten
Logistik und Infrastruktur	Hafenanlagen, Netz- verfügbarkeit	Wirtschaftlichkeit Installationsort	A.2 - geografi- sche Karten
Wassertiefen	MSL [m]	Installationsort	A.3 - ozeanogra- fische Karten
Oberflächengeschwindigkeiten	$V_s$ [m/s]	Wirtschaftlichkeit	A.3 - Tidenatlan- ten
Ortsbestimmung (Messung)	GPS [WGS84]		A.4
Bodenkontur und Wassertiefen	MSL(x,y) [m]	Installationsort	B.1 - Tiefenmes- sung
Strömungsdaten (Geschwin- digkeit und Richtung)	U(t) [m/s] V(t) [m/s] W(t) [m/s]	Lasten/Lebensdauer Installation	C.1 - ADCP Studie (gemittelter Da- tensatz)
Jahresenergieertrag	AEP [MWh]	Wirtschaftlichkeit	
Tidenhöhen /-stände	LAT/MSL/HAT(t) [m]	Installation Lasten/Lebensdauer	
Strömungsgrenzschicht	Char. Grenzschicht- koeffizient C [-]	Lasten/Lebensdauer	
Tidenkonstanten	harmonische Kon- stanten (vgl. [1])	Wirtschaftlichkeit Lasten/Lebensdauer	
Turbulenzgrad, turbulente Zeit- und Längen- skalen turbulente kinetische Energie	Tu [%] L [m], Lt [s] q [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	Lasten/Lebensdauer	C.2 - ADCP Studie (ungemittelter Datensatz)
Reynoldsspannungen	$-\overline{u'w'}, -\overline{v'w'}$ [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]		
Wellendaten bzw. -spektren	Hs [m], H <sub>max</sub> [m], T <sub>P</sub> [s] Weibull-Spektrum	Lasten/Lebensdauer	
Wellenhöhen (Spektrum) (a)	S(H <sub>S</sub> ,x,y) [%] S(H <sub>max</sub> ,x,y) [%]	Lasten/Lebensdauer	D.1 - Modellsi- mulation
Wellenperioden (Spektrum) (b)	S(T <sub>P</sub> ,x,y) [%]	Lasten/Lebensdauer	
Strömungsdaten (c)	U(x,y,t) [m/s] V(x,y,t) [m/s]	Lasten/Lebensdauer	
Wetterdaten (Spektrum) (d)	S(U <sub>10</sub> ,x,y) [%]		
Korrelation von (a),(b),(c),(d)	H <sub>s,max</sub> (V <sub>S</sub> ) [m]	Installationsort	

	$T_{p,max}(H_{S,month}) [s]$ $U_{10,max}(H_{S,month}) [m/s]$	Lasten/Lebensdauer	
Ortsbestimmung (Installation)	GPS [WGS84]		D.2
Meeresboden	Bilder	Installation	E.1 - ROV Studie
Bodenbeschaffenheit I	Dichte [ $g/cm^3$ ] Schub- und E-Modul [GPa] Reibkoeffizient [-]	Installation Gründungskonzept	E.2 - Bohrprobe
Bodenbeschaffenheit II	Dichte(z)[ $g/cm^3$ ] Schub- und E-Modul [GPa] Reibkoeffizient [-]	Installation Gründungskonzept	E.3 - Seismische Studie
Design Basis	Spezifikation	Alle Bereiche	F.1

### 3 Methoden zur Analyse von Strömungsmessdaten

Die im folgenden Abschnitt verwendeten Parameter und Sachverhalte beziehen sich auf ein am Meeresboden angebrachtes ADCP Messgerät des Herstellers RDI (Workhorse Sentinel Serie), die Kenngrößen anderer Hersteller können sich von diesen unterscheiden.

#### 3.1 Grundsätzliche Charakterisierung der Gezeitenströmung

Für den Auslegungsprozess einer Gezeitenströmungsanlage stellen die Strömungsmessdaten die wichtigste Säule dar. Die Gezeitenströmung setzt sich dabei aus einer Überlagerung unterschiedlicher Amplituden und Frequenzen zusammen. Während die dominanten Frequenzen der Gezeitenkräfte das untere Ende des Spektrums ausmachen (vorwiegend halb- und ganztägige Perioden, vgl. [1]), ist das obere Ende durch Turbulenzen charakterisiert, die durch Wellen, Grenzschichteffekte am Meeresgrund und Scherströmungen durch Landmassen (Perioden kleiner einer Sekunde bis mehrere Minuten) induziert werden. Dazwischen liegt ein freies Frequenzband.

Prinzipiell teilt sich die Auswertung der Messdaten daher in zwei Abschnitte:

- (a) einer Analyse von stationären Strömungsverhältnissen, die nur noch die Variation der Gezeiten beinhaltet (600s - 1200s Mittelung)
- (b) einer Analyse der turbulenten Strömung eines ungemittelten Datensatzes hoher Auflösung (0.25-2s Abtastung)



Ziel der Auswertung sind die in Tab. 1 unter C.1 (gemittelter Datensatz) und C.2 (ungemittelter Datensatz) angegebenen Parameter.

Es sei an dieser Stelle vorangestellt, dass die später benannten „Beam“-Koordinaten einem eindimensionalen Koordinatensystem des jeweiligen Strahls entsprechen und das „Earth“-Koordinatensystem das globale kartesische Koordinatensystem in der vertikalen Achse entspricht.

### 3.2 Das Messverfahren

Die Messung erfolgt mit einem ADCP, welches über vier Schallemitter bzw. -empfänger verfügt, die divergent zur vertikalen Achse (Winkel  $\theta$ ) nach oben ausgerichtet sind. Dabei kann die Ausrichtung des Messgeräts über die Winkel  $\varphi_1$  (Gierwinkel),  $\varphi_2$  (Nickwinkel) und  $\varphi_3$  (Rollwinkel) beschrieben werden. Über die Frequenzverschiebung des von Objekten in der Strömung reflektierten Schallsignals lässt sich die Partikelgeschwindigkeit (und damit die Strömungsgeschwindigkeit) in Strahlrichtung bestimmen (Gl. 1).

$$\begin{aligned} b_1 &= -u_1(\sin \theta + \varphi_3 \cos \theta) - w_1(\cos \theta - \varphi_3 \sin \theta) + v_1 \varphi_2 \cos \theta, \\ b_2 &= -u_2(\sin \theta + \varphi_3 \cos \theta) - w_2(\cos \theta - \varphi_3 \sin \theta) + v_2 \varphi_2 \cos \theta, \\ b_3 &= -v_3(\sin \theta + \varphi_2 \cos \theta) - w_3(\cos \theta - \varphi_2 \sin \theta) + u_3 \varphi_3 \cos \theta, \\ b_4 &= -v_4(\sin \theta + \varphi_2 \cos \theta) - w_4(\cos \theta - \varphi_2 \sin \theta) + u_4 \varphi_3 \cos \theta, \end{aligned} \quad (1)$$

Der dreidimensionale Strömungsvektor wird anschließend dadurch bestimmt, dass die detektierten Geschwindigkeiten gleicher Referenzhöhe zu einem Geschwindigkeitstriple (Gl. 2) zusammengefasst werden („beam-to-earth“ Transformation). Diese Methode unterliegt allerdings der Annahme, dass die Strömung in der horizontalen Ebene gleichförmig ist, die „error velocity“  $\hat{e}$ , als Maß der Ungleichförmigkeit, also gegen null strebt:

$$\begin{aligned} \hat{u} &= \frac{b_2 - b_1}{2 \sin \theta} - \varphi_3 \frac{b_1 + b_2}{2 \cos \theta}, \\ \hat{v} &= \frac{b_4 - b_3}{2 \sin \theta} - \varphi_3 \frac{b_3 + b_4}{2 \cos \theta}, \\ \hat{w} &= \frac{b_1 + b_2 + b_3 + b_4}{4 \cos \theta} - \varphi_3 \frac{b_2 - b_1}{2 \sin \theta} + \varphi_2 \frac{b_4 - b_3}{2 \sin \theta}, \\ \hat{e} &= -\frac{(b_1 + b_2) - (b_3 + b_4)}{4 \cos \theta} \end{aligned} \quad (2)$$

In Gegenwart turbulenter Strömung ist diese Annahme für die Momentangeschwindigkeit unzulässig, da die Geschwindigkeitskomponenten neben einer gewissen Störung durch Messungenauigkeit (gerätspezifisch, abhängig von der Konfiguration) auch Störungen von turbulenten Wirbeln unterliegen. Die Standardabweichung der Messungenauigkeit tritt unkorreliert auf

und nimmt durch eine Mittelung über  $N$  Datenwerte mit  $N^{1/2}$  ab. Die turbulenten Schwankungen hingegen treten korreliert oder teilkorreliert auf und das notwendige Mittelungsintervall lässt sich nur über die Kenntnis der turbulenten Zeitskalen bestimmen (vgl. [5]).

Somit unterliegt die Messung einem Dilemma, da zum einen der für Gezeitenenergie typische Standort turbulente Strömungen aufweist und zum anderen das Messverfahren (ADCP) dieser eben genannten Annahme unterliegt. Treten jedoch Wirbel in Größe (oder kleiner) der aufgespannten Ebene der Strahlen auf, ist diese Annahme unzulässig. Es muss also ein Weg gefunden werden, der eine zulässige Auswertung der Daten gewährleistet.

### 3.3 Auswertung in „Earth“-Koordinaten

Die erste Möglichkeit ist die direkte Transformation zu „Earth“-Koordinaten, wobei normalerweise Messwerte mit höherer „error velocity“ gefiltert werden um fehlerhafte Messungen auszuschließen. Dieser Filter muss in Gegenwart turbulenter Strömungen allerdings abgeschwächt werden, um diese Daten nicht zu verlieren.

Die Auswertung in „Earth“-Koordinaten erfolgt unter Kriterium (a) durch eine ausreichende Mittelung der Rohdaten. Wie beispielsweise in [5] gezeigt wurde, reichen hierfür Mittelungen zwischen 600s bis 1200s aus. Allerdings ist dieses Kriterium standortabhängig, da an manchen Orten auch periodisch auftretende Scherströmungen mit zeitlichen Skalen im Bereich dieser Mittelungsintervalle vorherrschen können.

Eine Analyse turbulenter Parameter der noch ungemittelten Daten ist hingegen streng genommen nicht zulässig, da die Momentangeschwindigkeiten über die horizontale Ebene variieren und somit die Transformation fehlerhaft machen.

Eine Messung in dieser Konfiguration ist daher vor allem für die Ermittlung der gemittelten Strömungsgrößen geeignet, da die Anforderungen an das Messsystem niedriger sind (siehe [8]) und der Anwender nicht für die in Abschnitt 3.4 beschriebenen Voraussetzungen Sorge tragen muss. Im Rahmen dieser Arbeit wird auf die Auswertung in „Earth“-Koordinaten nicht näher eingegangen.

### 3.4 Auswertung in „Beam“-Koordinaten

Für die Messung in „Beam“-Koordinaten muss zunächst eine feste Einspannung des ADCP Geräts sichergestellt sein, da ansonsten größere Fehler durch die Bewegung des Messgeräts induziert werden können. Ebenso muss die Ausrichtung des Geräts möglichst senkrecht sein (vgl. [5]). Dies stellt hohe Anforderungen

an das Gehäuse, die Einspannung und die Aufstellung des Geräts dar und führt somit zu höheren Kosten.

Sind diese Voraussetzungen gegeben, ist eine Auswertung in „Beam“-Koordinaten möglich. Für die mittleren Strömungsgrößen (Kriterium (a)) zeigt [5], dass das Mittelungsintervall  $\tau$  in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit  $U$  und der Spannweite der Strahlen  $L$  gewählt werden muss. Der hierzu gewählte Parameter sei  $M$ :

$$M = \frac{U \cdot \tau}{L} \quad (3)$$

Erreicht  $M$  eine hinreichende Größe, so kann statistische Homogenität der Geschwindigkeitsparameter angenommen werden und die Auswertung unter (a) ist zulässig.

In der Untersuchung durch [5] ergab sich ein maximales  $M$  von 55, allerdings muss angemerkt werden, dass diese Größe standortabhängig ist und gegebenenfalls überprüft werden muss. Dieser Wert entspricht bei einer Referenzhöhe von 25m über Grund, eines Strahlwinkels  $\theta$  von  $20^\circ$  und einer Geschwindigkeit  $U$  von 1-3m/s einem notwendigen Mittelungsintervall von  $\tau \approx 300-900$ s. Bereits daran ist zu erkennen, weshalb gemittelte Datensätze über 600s-1200s notwendig sind.

Die Auswertung des ungemittelten Datensatzes (Kriterium (b)) erfolgt mit der Varianzmethode, wie sie etwa in [6] beschrieben wird. Diese setzt, neben der für ein bestimmtes Zeitintervall bereits beschriebene statistische Gleichförmigkeit der Strömungsgrößen erster Ordnung, dieses Kriterium auch für die Strömungsgrößen zweiter Ordnung voraus. Die Gültigkeit dieser Annahme konnte unter anderem durch [7] bestätigt werden. Auf Basis der Varianzmethode können zwei Komponenten der Reynoldsspannungen und eine Größe  $S$ , die über das Maß der Anisotropie  $\alpha$  mit der turbulenten kinetischen Energie  $q$  gekoppelt ist, bestimmt werden (Gl. 4).

$$\begin{aligned} -\overline{u'w'} &= \frac{\overline{b_2'^2} - \overline{b_1'^2}}{2 \sin 2\theta} + \varphi_3(\overline{u'^2} - \overline{w'^2}) - \varphi_2 \overline{u'v'} \\ -\overline{v'w'} &= \frac{\overline{b_4'^2} - \overline{b_3'^2}}{2 \sin 2\theta} + \varphi_2(\overline{v'^2} - \overline{w'^2}) - \varphi_3 \overline{u'v'} \\ S &= \frac{1}{4 \sin^2 \theta} (\overline{b_1'^2} + \overline{b_2'^2} + \overline{b_3'^2} + \overline{b_4'^2}) - (\varphi_3 \overline{u'w'} - \varphi_2 \overline{v'w'}) \left( \frac{1}{\tan^2 \theta} - 1 \right) \\ \text{bzw. } S &= \frac{1}{1 + \alpha} \left( 1 + \frac{2\alpha}{\tan^2 \theta} \right) \frac{q^2}{2} \end{aligned} \quad (4)$$

Weiterhin lassen sich über diese Parameter und den Grenzschichtverlauf die Produktionsrate  $P$  und die turbulente Viskosität (Koeffizient  $A_v$ ) abschätzen, auf deren Definition hier nicht näher eingegangen wird.

Ebenso können der Turbulenzgrad  $Tu$  sowie das turbulente Spektrum, welches durch die Nyquist-Frequenz beschränkt wird, ermittelt werden.

Obwohl durch [7] gezeigt werden konnte, dass die gemittelten Strömungsgrößen und beispielsweise die Reynoldsschen Schubspannungen verlässlich bestimmt werden können, wird die Genauigkeit von den folgenden Faktoren beeinflusst:

- Bewegung des Messgeräts während der Messung
- Ausrichtung des Messgeräts
- Messungenauigkeit des Geräts (Rauschen des Doppler-Signals)
- räumliche und zeitliche Auflösung der Daten
- Intensität und Isotropie der Turbulenz
- niederfrequente Wirbel mit Perioden größer als das Mittelungsintervall

Um TKE bestimmen zu können, muss ein Wert für  $\alpha$  angenommen werden. Dieser reicht von null für vollständig anisotrope Turbulenz bis 0.5 für isotrope Turbulenz. In einer speziellen Messanordnung mit einem fünften senkrecht ausgerichteten Strahl lässt sich über die Messung von  $w$  und dessen Varianz das Maß der Anisotropie  $\alpha$  und somit TKE direkt bestimmen ([6]).

Die Bestimmung der turbulenten Zeit- und Längenskalen sind hingegen nur bedingt möglich. Dies wird beschränkt durch die vertikale Auflösung der Messung, die Spannweite der Strahlen, die Auflösbarkeit der drei Geschwindigkeitskomponenten aus den „Beam“-Koordinaten und die zeitliche Datenrate. Somit ist das Spektrum nach oben hin beschränkt und es verbleibt eine gewisse Unsicherheit, die bedingt durch die Messmethode nicht aufgelöst werden kann. Andere Parameter jedoch, wie die Reynoldsschen Schubspannungen oder die turbulente kinetische Energie, welche kaum von kleinen Skalen beeinflusst werden, können recht zuverlässig bestimmt werden [7]. Durch die starke Standortabhängigkeit bleibt dies aber nach der Methode von [6] zu prüfen. Vor allem vor dem Hintergrund, dass kleinere Wirbel meist keinen großen Einfluss auf die maximalen Lasten der Turbine haben, im Gegenzug hierzu aber durch die höheren Frequenzen einen maßgeblichen Einfluss auf die Lebensdauer haben können.

## 4 Fazit

Die Beschreibung einer Gezeitenressource beginnt mit einer vorläufigen Stanortauswahl und umschließt eine Reihe von Messungen und Analysen bis hin

zu der Spezifikation der Design Basis, die den Ausgangspunkt jeder weiteren Auslegungsphase der Anlage darstellt. Diese Prozesse und deren Ergebnisse während der Standortvermessung haben großen Einfluss auf Durchführbarkeit und die Wirtschaftlichkeit des gesamten Projekts. Der erste Abschnitt beschreibt auf Basis laufender Voith Projekte und internationalen Standards einen Prozessablauf und wichtige zu ermittelnde Einflussparameter, die für die Beurteilung der Ressource notwendig sind. Der Kernpunkt stellt dabei die Strömungsvermessung mittels eines ADCP Messgeräts dar, unterliegt aber einigen in Kap. 3 beschriebenen Einschränkungen und Annahmen. In diesem zweiten Teil der Arbeit wurden anhand von verwandten Studien die Möglichkeiten und Grenzen der Messmethode beschrieben. So können unter bestimmten Voraussetzungen an das Messsystem und mittels einer Auswertung in „Beam“-Koordinaten einige der charakteristischen turbulenten Parameter mit hinreichender Genauigkeit aufgelöst werden.

Eine abschließende Empfehlung ist es, zunächst eine einfache ADCP Studie durchzuführen, sofern der Ort der Installation noch offen ist. Und erst nach einer eindeutigen Standortbestimmung mit einer komplexeren Studie die höheren Frequenzen in der Strömung aufzulösen und zu charakterisieren. Letztlich verbleibt aber zu sagen, dass eine vollständige Charakterisierung der Turbulenz und eine hinreichende Reduktion der Unsicherheiten in der Bestimmung mancher Parameter mit dieser Messmethode nicht möglich sind.

## Literatur

- [1] Boon, J.D.: Secrets of the Tide, 2004, 1. Auflage, Chichester (England): Horwood Publishing Limited
- [2] Germanischer Lloyd (GL): Guideline for the Certification of Offshore Wind Turbines, 2007
- [3] Germanischer Lloyd (GL): Guideline for the Certification of Ocean Energy Converters, Part 1: Ocean Current Turbines, 2010
- [4] International Electrotechnical Commission IEC 62600-3-2/CD: Marine Energy - Wave, Tidal and other Water Current Converters - Part 3-2: Tidal Energy Resource Characterization and Assessment, 2010, Ausgabe 1.0
- [5] Lu, L.; Lueck, R.G.: Using a Broadband ADCP in a Tidal Channel. Part I: Mean Flow and Shear, 1999, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, Band 16
- [6] Lu, L.; Lueck, R.G.: Using a Broadband ADCP in a Tidal Channel. Part II: Turbulence, 1999, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, Band 16
- [7] Nystrom, E.A.; Rehmann, C.R.; Oberg, K.A.: Evaluation of Mean Velocity and Turbulence Measurements with ADCPs, 2007, Journal of Hydraulic Engineering, Seiten 1310-1318
- [8] RD Instruments: Workhorse Sentinel ADCP User's Guide, January 2001
- [9] Ruprecht, A.; Weilepp, J.: Gezeitenströmungskraftwerke, März 2009, Artikel Wasserwirtschaft

## Autor / Kontakt:

Dipl.-Ing. Philipp Daus  
Voith Ocean Current Technologies GmbH & Co KG  
Alexanderstr. 11  
D-89522 Heidenheim  
Tel.: +49 – 7321 – 37 9040  
Fax: +49 – 7321 – 37 7350  
philipp.daus@voith.com